I. MJERNI SUSTAVI

Da bismo mogli izraziti fizikalne zakone kojima se pokoravaju razne prirodne pojave i procesi, bilo je potrebno uvesti tzv. **fizikalne veličine.** Pod tim se veličinama razumijevaju svi oni pojmovi koji karakteriziraju fizikalna svojstva i stanja materijalnih tijela i prostora, kao što su dužina, masa, vrijeme, brzina, temperatura, jakost struje, magnetska indukcija itd.

Fizikalne zakone prikazujemo u obliku matematičkih jednadžbi. Zato moramo sve fizikalne veličine predočivati njihovim simbolima koji su međusobno određeni i svagdje priznati. Budući da se fizikalne veličine razlikuju međusobno i po naravi i po količini, moramo — ako primjenom matematičkog oblika fizikalnog zakona želimo odrediti količinski iznos neke fizikalne veličine — svaku veličinu izraziti zasebno njenom brojčanom vrijednošću. U tu svrhu uzimamo jedan točno određeni iznos svake fizikalne veličine kao njenu **jediničnu mjeru** ili **jedinicu.** Uspoređivanjem fizikalne veličine s njenom mjernom jedinicom možemo odrediti njenu količinsku (brojčanu) vrijednost.

U principu možemo za svaku fizikalnu veličinu potpuno slobodno odabrati bilo kakvu jedinicu. Međutim, s obzirom na tehničku i naučnu povezanost ne samo pojedinih skupina ljudi nekog prostorno ograničenog područja nego i čitavog čovječanstva, treba da za mjernu jedinicu uzmemo onu jedinicu, koju će prihvatiti svi narodi svijeta i koja će na taj način imati jedinstvenu, apsolutnu vrijednost.

Da bi sustav jedinica bio što praktičniji, odabiremo kao **osnovne** veličine one čije se jedinice dadu lako definirati i izraditi kao tzv. **pramjera** ili **etalon.**

Uspoređivanje mjerene veličine s njenom jedinicom zove se **direktno mjerenje.** Takvo mjerenje vršimo npr. kada neku dužinu mjerimo metrom, kada jakost struje mjerimo ampermetrom i sl.

Međutim, ima mnogo takvih veličina čiji brojčani iznos ne možemo ustanoviti direktnim mjerenjem. U takvu slučaju primjenjujemo **indirektno mjerenje.** Ono se sastoji u tome da najprije odredimo brojčani iznos onih veličina koje s njom povezuje isti fizikalni zakon, a zatim računski odredimo njenu brojčanu veličinu.

Rekli smo da bismo principijelno mogli za svaku fizikalnu veličinu odabrati po volji mjernu jedinicu. U tom slučaju imali bismo toliko jedinica koliko ima nezavisnih veličina. Nedostatak takvog izbora očitovao bi se u tome što bismo u izraze kojima izražavamo pojedine fizikalne zakonitosti morali uvrštavati još i posebne koeficijente. Njihov bi zadatak bio da matematički izjednače obje strane jednadžbe. Takvi koeficijenti, čija veličina zavisi od izbora jedinica za fizikalne veličine u dotičnom zakonu, zovu se **parazitni koeficijenti.** Oni su nam se naime

nametnuli zbog upotrebe jedinica koje međusobno nisu povezane nikakvim zakonom, nego smo ih odabrali po volji. Da bismo takve koeficijente izbjegli, moramo jedinice odabrati tako da kod primjene bilo kojeg fizikalnog zakona vrijednost parazitnih koeficijenata bude jednaka jedan.

Posao olakšavamo sebi na taj način da u nekom zakonu po volji odaberemo jedinice za sve veličine osim jedne: tu posljednju jedinicu izaberemo tako da vrijednost parazitnog koeficijenta iznosi jedan. Mjerni sustav u kojemu su jedinice na takav način **usklađene** zove se **koherentni sustav.** Mjerni pak sustav u kojemu se zbog prevelikog broja proizvoljno odabranih jedinica javljaju parazitni koeficijenti zove se **neusklađeni** ili **nekoherentni sustav.**

One jedinice koje smo po volji odabrali za niz raznih fizikalnih veličina i koje, prema tome, tvore temelj mjernog sustava zovu se **osnovne jedinice,** a veličine koje njima mjerimo zovu se **osnovne veličine** mjernog sustava. Sve ostale jedinice koje proizlaze iz odgovarajućih fizikalnih zakona i odnosa zovu se **izvedene jedinice,** a veličine koje njima mjerimo zovu se **izvedene veličine.**

Skup svih osnovnih i s njima povezanih izvedenih jedinica zove se **mjerni sustav.** Danas se služimo samo koherentnim sustavima mjernih jedinica. Postoji nekoliko koherentnih sustava koji se međusobno razlikuju bilo u pogledu izbora osnovnih veličina, bilo u pogledu izbora osnovnih jedinica. Ako su osnovne jedinice u raznim sustavima različite, imat će ista veličina u svakom sustavu drugu jedinicu.

Zakonske odnose između veličina koje su sastavni dio promatranog fizikalnog procesa možemo prikazati u tri oblika, naime kao:

a) **brojčani** odnos

b) **veličinski** odnos ili

c) **dimenzioni** odnos.

Pod **brojčanim** odnosom razumijevamo odnos u kojemu znakovi izražavaju brojčane vrijednosti fizikalnih veličina, ali iz njih nisu vidljive odgovarajuće mjerne jedinice.

Pod **veličinskim** odnosom razumijevamo odnos u kojemu simboli izražavaju fizikalne veličine: iz njega vidimo međusobni odnos između veličina koje sudjeluju u prikazanom procesu.

Pod **dimenzionim** odnosom razumijevamo odnos u kojemu je vidljiva povezanost osnovnih jedinica i izvedene jedinice: iz njega vidimo kako se neka izvedena jedinica mijenja zavisno o promjeni osnovnih jedinica.

1. MJERNI SUSTAVI U MEHANICI

Očito je da jedna od osnovnih veličina te grane nauke mora biti **dužina** jer ona je karakteristična za sve zakone mehanike. S pomoću nje prikazujemo udaljenosti između raznih točaka prostora, izražavamo površine raznih ploha i sl. Jasno je da samo jedna osnovna veličina ne može biti dovoljna za ilustraciju mnogobrojnih zakonitosti s kojima se susrećemo na svakom koraku. Zato treba odabrati još neke

osnovne veličine. Kao slijedeća dolazi u obzir **vrijeme,** jer su sve prirodne pojave vezane uz određeni vremenski interval. S pomoću tih dviju veličina možemo prikazivati odnose između svih kinematičkih veličina, a s pomoću osnovnih jedinica za dužinu L i vrijeme T možemo definirati jedinice svih kinematičkih veličina.

U životu susrećemo važne pojave za čiju nam ilustraciju nisu dovoljne samo spomenute dvije veličine jer su vezane uz veličinu **masa,** odnosno veličinu **sila.** Zbog toga moramo još i jednu od njih uzeti kao osnovnu. Već prema tome da li kao treću osnovnu veličinu uzmemo masu M ili silu F dobivamo dva mjerna sustava. U jednom su osnovne veličine dužina L, masa M i vrijeme T, pa ga zato zovemo sustav LMT (dužina-masa-vrijeme); u drugom sustavu su osnovne veličine dužina L, sila F i vrijeme T, pa ga zato zovemo sustav LFT (dužina-sila-vrijeme). Pod **pojmom masa razumijevamo sposobnost tijela da za svaku promjenu svoje brzine uzrokuje utrošak odgovarajuće količine energije.** Ako, na primjer, želimo promijeniti brzinu nekoga tijela — bilo da ga želimo pokrenuti ili zaustaviti, ubrzati ili usporiti — moramo utrošiti energiju koja je razmjerna količini materije u tom tijelu, tj. njegovoj masi.

Sustav LMT je utoliko prikladniji što njegova osnovna veličina masa M ima bilo na kojemu mjestu zemaljske kugle uvijek istu apsolutnu vrijednost, dok se to za silu F u sustavu LFT ne može reći. Sila zavisi o položaju promatrane točke na površini Zemlje (težina tijela je sila kojom ono pritište na vodoravnu podlogu, a ta je npr. veća na polovima nego u blizini ekvatora) pa zato ne može imati apsolutnu vrijednost.

Zbog apsolutne vrijednosti osnovnih jedinica sustava **LMT** zove se on **apsolutni sustav** i zato ga je nauka i prihvatila. Prema odabranim osnovnim jedinicama sustava-**LMT** razlikujemo:

a) sustav **CGS** i

b) sustav **MKS.**

U sustavu **CGS** osnovne su jedinice:

za dužinu	centimetar	(**cm**)
za masu	gram	(**g**)
za vrijeme	sekunda	(**s**),

dok su u sustavu **MKS** osnovne jedinice:

za dužinu	metar	(**m**)
za masu	kilogram	(**kg**)
za vrijeme	sekunda	(**s**).

Svaki od ta dva apsolutna sustava ima svoje područje primjene. Za teoretska istraživanja u fizici prikladnije su male jedinice pa se zato tamo upotrebljava sustav **CGS.** Za praktičke svrhe prikladnije su veće jedinice pa se zato u mehanici za svakodnevne potrebe upotrebljava sustav **MKS.**

Jedinica dužine **metar** bila je još god. 1889. definirana kao udaljenost između dvije oznake na naročitoj šipci od slitine platina-iridij (10% iridija) pri temperaturi

0°C. Ta šipka čuva se u Međunarodnom uredu za mjere i utege kraj Pariza. To je bio tzv. **internacionalni metar.**

S napretkom nauke o mjerenju (tzv. metrologije) došlo se do spoznaje da spomenuta jedinica za dužinu nije više dosta točna pa je na zasjedanju Generalne konferencije za mjere i utege god. 1960. određena nova definicija metra. Ona glasi:

jedinica za dužinu **metar** jednaka je 1 650 763,73 valnih duljina narančastog zračenja kriptona u vakuumu (odgovara prijelazu atoma kriptona 86 između energetskih nivoa $2P_{10}$ i $5d_5$). Stoti dio metra je **centimetar.**

Jedinica mase **kilogram** bila je najprije definirana kao masa kubičnog decimetra kemijski čiste vode maksimalne gustoće pri 3,98°C i pritiska 760 mm stupca žive. Da bi se izbjegla netočnost mjerenja, izrađen je od slitine platine i 10% iridija valjak i njegova je masa uzeta kao jedinica, a čuva se također u Međunarodnom uredu za mjere i utege. Masa toga valjka predočuje tzv. **internacionalni kilogram.**

Treba spomenuti da se i jedinica težine **kilogram-sila** definira s pomoću istoga etalona. Budući da kilogram-masa i težina (kilogram-sila) nisu identične jedinice, odlučeno je — da bi se izbjegla zabuna — da se kilogram-masa označi simbolom **kg,** a kilogram-sila simbolom **kp** (jedinica težine). Analogno tome se gram-masa kao tisući dio kilogram-mase označuje simbolom **g,** dok se gram-sila kao tisući dio kilogram-sile označuje simbolom **p.**

Jedinica vremena **sekunda** bila je prvobitno definirana kao $\frac{1}{24 \cdot 60 \cdot 60} =$ $= 86\,400.$ dio srednjeg Sunčeva dana. Kasnije je Generalna konferencija za mjere i utege odredila novu definiciju, prema kojoj je **sekunda** trajanje 31 556 925,975. dijela tropske godine u 12 sati na dan 1. siječnja 1960. Ta definicija sekunde na temelju astronomskih podataka točnija je od prijašnje.

U sustavu **MKS** bile bi jedinice nekih izvedenih veličina slijedeće (prikazane **dimenzionim jednadžbama**):

za površinu $A = L \cdot L = L^2$ (**m**^{2})

za volumen $V = L \cdot L \cdot L = L^3$ (**m**^{3})

za brzinu budući da se pod brzinom razumijeva put što ga materijalna točka kod jednolikog pravocrtnog gibanja prevali u sekundi, dimenziona će jednadžba za jedinicu brzine glasiti

$$v = \frac{L}{T} = L \cdot T^{-1} \qquad \left(\frac{m}{s}\right) = (\mathbf{m \cdot s^{-1}})$$

za ubrzanje pod ubrzanjem (akceleracija) razumijevamo prirast brzine materijalne točke u sekundi tako da dimenziona jednadžba za jedinicu akceleracije glasi

$$a = \frac{v}{T} = \frac{L}{T^2} = L \cdot T^{-2} \ldots \left(\frac{m}{s^2}\right) = (\mathbf{m \cdot s^{-2}})$$

za silu dimenziona jednadžba za jedinicu sile slijedi iz zakona za veličinu sile $F = m \cdot a$ pa imamo:

$$F = M \cdot L \cdot T^{-2} \qquad (\mathbf{kg\ m\ s^{-2}})$$

Jedinica sile je njutn (**N**). Sila 1 N je ona sila koja masi 1 kg daje ubrzanje 1 m u sekundi po sekundi.

za radnju — dimenzionu jednadžbu za jedinicu radnje dobivamo iz izraza za radnju $W = F \cdot L$ pa imamo:

$$W = M \cdot L \cdot T^{-2} \cdot L = M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \ldots (\mathbf{kg\ m^2\ s^{-2}})$$

Jedinica radnje je džul (**J**). Radnju 1 J obavi sila 1 N na putu 1 m.

za snagu — dimenzionu jednadžbu za jedinicu snage dobivamo s pomoću izraza $P = \frac{W}{T}$ pa imamo:

$$P = M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot \frac{1}{T} = M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \ldots (\mathbf{kg\ m^2\ s^{-3}})$$

Jedinica za snagu je vat (**W**). Snaga 1 W odgovara radnji 1 J obavljenoj u 1 s.

Na analogan način mogli bismo primjenom dimenzionih jednadžbi odrediti izvedene jedinice i u sustavu **CGS** kad bismo u njih uvrštavali osnovne jedinice toga sustava.

2. MJERNI SUSTAVI U ELEKTROTEHNICI

Mnoge pojave i procesi u elektrotehnici izravno su povezani s veličinama iz mehanike pa se logički postavlja pitanje povezivanja mehaničkih sustava veličina i jedinica s elektrotehničkima. Za to povezivanje upotrebljavamo Coulombov zakon [Kulon], s pomoću kojega je najprije mehanički sustav **CGS** proširen i na elektrotehničke veličine, i to tako da je dielektrička konstanta za vakuum ε_0 uzeta kao da ima vrijednost jedan i da nema nikakvih dimenzija. Takvim rješenjem bilo je moguće jedinicu količine elektriciteta definirati s pomoću tri osnovne mehaničke veličine. Tako je stvoren tzv. **elektrostatski** sustav **CGS**, prikladan za područje elektrostatike. Nazvan je kraćim imenom sustav **CGSE.**

Neki su znanstvenici smatrali da su u elektrotehnici praktički važnije elektromagnetske pojave nego elektrostatske pa da je zgodnije sustav **CGS** prilagoditi Coulombovu zakonu, koji vrijedi za područje magnetizma. Tako je nastao **elektromagnetski** sustav **CGS**, koji je kraće nazvan sustav **CGSM**. U tomu sustavu je magnetska permeabilnost vakuuma μ_0 (mi) uzeta kao vrijednost jedan i bez dimenzija. Na taj je način stvorena mogućnost da se jedinica magnetske mase odredi s pomoću tri osnovne jedinice iz mehanike. Isto tako mogu se odrediti i jedinice svih ostalih elektrotehničkih veličina. Posljedica takvoga rješenja bila je između ostalog i ta da su dimenzione jednadžbe za iste jedinice bile u oba sustava različite.

Praksa je pokazala da mnoge jedinice elektromagnetskog sustava **CGSM** nisu prikladne za elektrotehničku praksu jer su ili prevelike ili premale. Zato je na Međunarodnom kongresu električara god. 1881. u Parizu bilo odlučeno da se uvede tzv. **praktički** sustav, kod kojega su jedinice elektrotehničkih veličina jednake dekadskim višekratnicima ili potkratnicima jedinica sustava **CGSM.**

Kao osnovne jedinice **praktičkog** sustava **CGSM** određene su:

- jedinica električkog otpora **om** (Ω), koji je jednak 10^9 jedinice otpora u sustavu **CGSM** i
- jedinica jakosti električke struje **amper** (**A**), koji je jednak 10^{-1} jedinice jakosti struje u sustavu **CGSM.**

Obje ove jedinice bile su određene eksperimentalno, i to:

om kao otpor stupca žive dugog 106,3 cm, presjeka 1 mm^2 pri 0°C, a **amper** kao jakost struje koja iz otopine srebrnog nitrata $AgNO_3$ u jednoj sekundi izluči 0,001 118 g srebra.

Na temelju jedinica **om** i **amper,** kao i jedinice **sekunda** izvedene su sve ostale elektrotehničke jedinice. Tako je jedinica napona **volt** (**V**) određena na osnovu **Ohmova** [Om] zakona, koji glasi $\mathbf{U = I \cdot R}$. Jedinica napona **volt** jednaka je 10^8 jedinica napona u sustavu **CGSM.**

Kod kombinirane primjene elektromagnetskog sustava **CGSM** i praktičkog sustava **CGSM** javljali su se u mnogim formulama parazitski koeficijenti, koji su računske postupke nepotrebno komplicirali. Da bi se izbjegle te komplikacije, bilo je raznih prijedloga za stvaranje jedinstvenog mjernog sustava. Od svih tih prijedloga pokazao se najlogičnijim onaj što ga je još god. 1901. predložio Carlo Giorgi [Karlo Đorđi], profesor sveučilišta u Milanu. Prema njegovu prijedlogu bile bi osnovne jedinice novog sustava **metar** (za dužinu), **kilogram** (za masu), **sekunda** (za vrijeme) i **om** (za električki otpor). Međutim, god. 1935. odlučeno je da četvrta osnovna jedinica ne bude **om,** nego **amper** (za jedinicu struje), i da se ujedno definicija ampera promijeni u skladu s usavršenim metodama mjerenja. Prema toj novoj definiciji

amper (A) je konstantna jakost struje koja — prolazeći kroz dva usporedna ravna vodiča beskonačne duljine i zanemarivo maloga presjeka, međusobno razmaknuta jedan metar u vakuumu — djeluje po svakom metru njihove duljine silom $2 \cdot 10^{-7}$ N.

Prema tome je **Giorgijev** sustav, sustav **MKSA** (metar-kilogram-sekunda--amper), odnosno sustav **LMTI.** U tom se sustavu definiraju još

kulon (**C**): **količina elektriciteta** koja prođe u sekundi kroz presjek vodiča ako njime teče konstantna struja od 1 A

volt (**V**): **napon** (potencijalna razlika) između dviju točaka vodiča kroz koji teče struja 1 A ako se među njima utroši snaga od 1 W

om (Ω): **otpor** između dvije točke vodiča među kojima vlada konstantna potencijalna razlika od 1 V koja njime tjera struju od 1 A ako sam vodič ne proizvodi nikakvu elektromotornu silu

vat (**W**): **snaga** koja svake sekunde izvrši radnju od 1 J

džul (**J**): **radnja** koja se obavi kad se tijelo pod djelovanjem sile od 1 N pomakne u smjeru sile za 1 m

farad (**F**): **kapacitet** kondenzatora kojemu naboj od 1 C povisi napon za 1 V

simens (**S**): **vodljivost** vodiča čiji je otpor 1 Ω

veber (**Wb**): **magnetski tok** obuhvaćen zavojem od 1 Ω ako pri nestanku toka proteče kroz zavoj količina elektriciteta od 1 C (linearna promjena toka od 1 Wb/s inducira u zavoju napon od 1 V)

henri (**H**): **induktivnost** zatvorenog strujnog kruga kroz koji vlastita struja od 1 A tjera magnetski tok od 1 Wb (linearna promjena struje od 1 A/s inducira u krugu od 1 H napon od 1 V)

tesla (**T**): **magnetska indukcija** u svakoj točki ravnine površine 1 m^2 kroz koju okomito prolazi homogeni magnetski tok od 1 Wb

vatsekunda (**Ws**): električka **radnja** koju obavi 1 W u vremenu od 1 s (odgovara radnji od 1 J)

kilovat-sat (kWh): **radnja** koju obavi 1 kW u vremenu od 1 sata.

Osim **Giorgijeva** sustava primjenjuje se u praksi još i tzv. **Mićov** [Mie] sustav, kod kojega su osnovne veličine napon **U**, struja **I**, dužina **L** i vrijeme **T**. To je, dakle, sustav **UILT** (volt-amper-metar-sekunda) ili sustav **VAms**. Taj je sustav koherentan s **Giorgijevim** sustavom, a karakterističan je po tome što ne priznaje mehaničku masu kao osnovnu jedinicu.

Radi uvođenja reda i logičnosti u mjerne sustave službeno je samo **Giorgijev** sustav priznat kao mjerodavan za područje elektrotehnike.